Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 1, Spring 2023, p. 47-60

Quinoa Phenological Development Modeling Based on Field Data

Sh. Eghbali[1*], M. Nassiri-Mahallati[2], M. Jahan[2], M. Salehi[3]

Received: 27-01-2022
Revised: 21-05-2022
Accepted: 19-06-2022

How to cite this article:
Eghbali, Sh., Nassiri-Mahallati, M., Jahan, M., & Salehi, M.,(2023). Quinoa Phenological Development Modeling Based on Field Data. *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(1), 47-60. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.74969.1145

Introduction

Climate change is rapidly degrading the conditions of crop production. For instance, increasing salinization and aridity is forecasted to increase in most parts of the world. As a consequence, new stress-tolerant species and genotypes must be identified and used for future agriculture. Stress-tolerant species exist but are actually underutilized and neglected. Quinoa, scientifically known as Chenopodium quinoa Willd. is a member of the Amaranthaceae family. Promoting the cultivation and nutrition of quinoa will diversify food products in the country, sustainable production, increase farmers' incomes and provide part of the community's food needs. Crop simulation models have been used for various studies such as selecting the appropriate cultivar, determining the best planting date, predicting the effect of diversity and climate change on growth. Field research requires a lot of time and money, while computer simulation models can save time and money by conducting extensive experimental simulations.

Materials and Methods

This research was conducted in two regions of Yazd province with 10 separate experiments in the form of a randomized complete block design with 3 replications. Experimental factors included 5 promising modified lines in Yazd Salinity Research Center with Titicaca cultivar. The lines consisted of four intermediate maturity lines, numbered 1 (NSRCQE), 2 (NSRCQC), 3 (NSRCQD), and 6 (NSRCQA), one late maturity line numbered 4 (NSRCQB), and the early maturity cultivar Titicaca numbered 5. Sampling and note-taking were performed regularly, once every three days, in proportion to the progress of the phenological stages of each line. A model based on degree-day-growth was prepared in FST language. In preparing the length table, due to the short day of Quinoa, for all lines in the model up to 12.5 hours, the development rate was one, and after 13.8 hours, the development rate was zero. The base temperature in the model was 2 °C. Then, the model was calibrated and evaluated with data taken from the field.

Results and Discussion

RMSE (CV) coefficient of variation between 7 to 12%, root mean square error (RMSE) between 4.4 to 6.4 days, Wilmot agreement index (d) between 0.99 to 1, model efficiency (ME) between 0.96 to 0.98, the mean deviation from the model (MB) was between 0.05 to 0.08 and the coefficient of determination (R^2) was between 92 % to 98%. These values indicated a good estimate of the day to flowering of quinoa with the model written in FST language, and the values of day to flowering simulated gained the necessary validity. The coefficient of variation of nRMSE (CV) is between 6.8 to 8.6%, the root mean square error (RMSE) is between 6.2 and 8.7 days, the Wilmot agreement index (d) is between 0.75 and 0.92, The mean deviation from the model (MB) was between 0.05 to 0.08 and the coefficient of determination (R^2) was between 92% and 98%. These values indicated a good estimate of the day to physiological maturity with the model written in the FST language, and

1- Ph.D. graduate, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran
(*- Corresponding Author Email: sh_weed@yahoo.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.74969.1145

the day values to the simulated physiological maturity gained the necessary validity. Calibration and evaluation of model efficiency using root mean square error (RMSE), coefficient of variation or nRMSE percentage (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), and mean model deviation (MB), coefficient of explanation (R^2), line test 1: 1 day until germination, flowering and good physiological maturity was estimated.

Conclusion

The results of this study indicated that, the quinoa model prepared for quinoa in terms of degree-day-growth well predicts the developmental stages (emergence, flowering and maturation) of this plant in terms of maturity (early, medium and late) and can be its help determined the appropriate planting date in different areas. This calibrated sub-model can now be used to evaluate different temperature and photoperiod effects for decision making in a wide range of growth environments in quinoa cultivation systems in current and future climatic conditions. Therefore, this sub-model can be used in educational-research and applied work in the field.

Keywords: FST, Growing degree days, Sowing date

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص ٦٠-٤٧

شبیه‌سازی نمو فنولوژیک کینوا بر اساس داده‌های مزرعه‌ای

شهاب اقبالی شاه آباد[۱*]، مهدی نصیری محلاتی[۲]، محسن جهان[۲]، معصومه صالحی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

چکیده

هدف از این پژوهش تهیه مدلی برای شبیه‌سازی نمو کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) و واسنجی و تعیین اعتبار آن بر اساس داده‌های مزرعه‌ای است. این تحقیق در دو منطقه استان یزد با ۱۰ آزمایش جداگانه و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. عامل‌های آزمایش شامل ۵ لاین امید بخش اصلاح‌شده در مرکز تحقیقات شوری یزد به‌همراه رقم تی‌تی‌کاکا بود. نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد. مدلی بر اساس درجه-روز-رشد با زبان برنامه‌نویسی FST تهیه و سپس اقدام به واسنجی و ارزیابی مدل با داده‌های برداشت شده از مزرعه شد. واسنجی و ارزیابی کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، آزمون خط ۱:۱ روز تا سبزشدن، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک خوب برآورد شد. این مدل تعیین اعتبارشده و هم‌اکنون می‌تواند برای ارزیابی تاثیرات مختلف دمایی و فتوپریودی برای تصمیم‌گیری در طیف وسیعی از محیط‌های رشد در نظام‌های کشت کینوا در شرایط اقلیمی جاری و آینده مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین از این مدل در کارهای آموزشی- تحقیقاتی و کاربردی در مزرعه می‌توان استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، FST، درجه-روز-رشد

مقدمه

کینوا (*Chenopodium quioa* Willd) گیاهی از خانواده *Amaranthaceae* است که بومی کوه‌های آند در بولیوی، شیلی و پرو بوده و در حال حاضر بولیوی، پرو و اکوادور مهم‌ترین تولیدکنندگان این گیاه هستند (Vega - Gálvez *et al.*, 2010). این گیاه انعطاف‌پذیری بالایی در سازگاری به فتوپریود، ارتفاع از سطح دریا، دما و خصوصیات خاک دارد؛ به‌طوری‌که، در مناطقی با ارتفاع ۴۰۰۰-۰ متر از سطح دریا، pH بین ۶ تا ۸/۵ و مناطقی با اقلیم خشک، نیمه‌خشک، حاره‌ای و مرطوب قابلیت کشت دارد. دوره رشد کینوا بسته به منطقه و نوع رقم مورد کشت بین ۷۰ تا ۲۴۰ روز متغیر است (Yang *et al.*, 2016). محصول اصلی این گیاه دانه است که ارزش غذایی بالایی ازنظر پروتئین، توازن اسیدآمینه، چربی غیراشباع، ویتامین‌ها و مواد معدنی دارد (Fischer *et al.*, 2017). بنابر گزارش‌های سازمان خواروبار جهانی این گیاه حتی در اراضی فقیر و غیرقابل کشت نیز می‌توان کشت کرد. علاوه بر این کشت کینوا در تناوب زراعی با غلات به منظور کنترل علف‌های هرز و بیماری‌ها توصیه می‌شود. ترویج کشت و تغذیه کینوا باعث تنوع‌بخشی محصولات غذایی در کشور، تولید پایدار، افزایش درآمد کشاورزان و تأمین بخشی از نیاز غذای جامعه خواهد شد. با توجه به نقش بالقوه این گیاه در بهبود امنیت غذایی در آینده و تحمل بالا به تنش‌های شوری و خشکی سازمان خوار و بار جهانی سال ۲۰۱۳ را به نام این گیاه نام‌گذاری کرد (FAO, 2014).

مدل ریاضی، معادله یا مجموعه‌ای از معادلات است که رفتار هر سیستم را به‌طور کمی توصیف می‌کند. سیستم، به بخش محدودی از جهان واقعی اطلاق می‌شود که شامل بخش‌هایی است که اثرات متقابل با هم داشته و در طی زمان تغییر می‌کند. از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب، تعیین خصوصیات مطلوب گیاهی، تعیین بهترین

۱- دانش‌آموخته دکتری اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استاد گروه اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- استادیار مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: sh_weed@yahoo.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.74969.1145

مدیریت زراعی، پیش‌بینی اثر تنوع و تغییر اقلیم بر رشد، تخمین عملکرد، برآورد ظرفیت تولید منطقه‌ای، تعیین خط‌مشی برای به‌نژادی، تعیین اولویت‌های تحقیقاتی و انتقال تکنولوژی طبقه‌بندی آگرواکولوژیک استفاده شده است. اجرای تحقیقات مزرعه‌ای به صرف وقت و هزینه زیاد نیاز دارد در حالی‌که مدل‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌تواند با انجام شبیه‌سازی آزمایش‌های وسیع باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه شوند (Matthews *et al.*, 2013). اما باید توجه داشت که مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به هیچ‌وجه نمی‌توانند جایگزین آزمایشات مزرعه‌ای شوند بلکه بهترین حالت آن است که به‌عنوان مکمل این آزمایش‌ها استفاده شوند. در این صورت مدل‌های گیاهان زراعی خواهند توانست تا حدودی نیاز به آزمایشات مزرعه را کاهش دهند و اثربخشی نتایج این آزمایش‌ها را بیشتر کنند. مدل‌سازی در آموزش‌های کاربردی برای محققین، دانشجویان، کارشناسان کشاورزی و حتی بهره‌برداران، ضمن کاهش هزینه‌ها موجب شناخت و درک بهتر استفاده‌کنندگان از فرایندهای پیچیده زیستی، فیزیولوژی و اکولوژی گیاهان زراعی خواهد شد؛ تا به حال مدل‌های متفاوتی برای پیش‌بینی فنولوژی گیاهان زراعی مختلف استفاده شده است (Rahban *et al.*, 2021; Bertero *et al.*, 1999; Soltani *et al.*, 2006)

تاریخ کاشت، نسبت به سایر روش‌های مدیریت زراعی بیشترین تأثیر را بر ویژگی‌های فنولوژیکی و رشدی گیاهان می‌گذارد (Pourghasemian *et al.*, 2018) و نقش مهمی در بهبود درصد سبز و رسیدن به حداکثر عملکرد دارد. تاریخ کشت مناسب کینوا به اقلیم منطقه و رقم بستگی دارد. ارقام زودرس کینوا برای کشت در شهریور و یا کشت بهاره، ارقام متوسطرس کینوا برای کشت در مرداد و یا کشت تابستانه، ارقام دیررس کینوا برای کشت در اسفند و یا کشت تابستانه در مناطق معتدل خشک کشور مناسب هستند (Eghbali *et al.*, 2021). این ارقام در مناطق معتدله در صورتی که در مرحله ۱۲ برگی باشند در طول زمستان زنده می‌مانند ولی بذر تولید نمی‌کنند (Salehi, & Dehghani, 2017). تعیین مناسب‌ترین تاریخ کاشت یعنی تعیین زمانی که رشد رویشی و زایشی گیاه بیشترین هماهنگی را با عوامل اقلیمی داشته و گیاه کمتر با شرایط نامساعد محیطی روبه‌رو شود (Qulipor *et al.*, 2003).

پیش‌بینی صحیح مراحل فنولوژی گیاهان زراعی برای بهینه‌سازی فعالیت‌های مدیریتی در مزرعه و سازگاری بهتر تقویم زراعی با سیستم‌های آگرواکولوژیک خاص بسیار مهم می‌باشد (Hirich *et al.*, 2014). جوانه‌زنی و سبزشدن از مهم‌ترین فازهای فنولوژیکی استقرار گیاه است. جوانه‌زنی بذر فرایند پیچیده‌ای از فرایندها و واکنش‌ها می‌باشد که همگی تحت تاثیر دما انجام می‌شود. مهم‌ترین مرحله فنولوژیک، مرحله گل‌دهی یعنی عبور گیاه از مرحله رویشی به زایشی است. با توجه به این‌که بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیک و مورفولوژیک با نوع گیاه تغییر می‌کند، کمی کردن نمو فنولوژیک در کلیه مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی لازم است (Soltani *et al.*, 2006). گیاه کینوا بعد از گرده‌افشانی، وارد فاز شیری یا خمیری و رسیدگی‌دانه می‌شود. با پرشدن دانه کاسبرگ‌ها باز می‌شوند و به‌صورت ستاره‌ای درمی‌آیند و رنگ پوسته بیرونی بذر مشخص می‌شود.

برخی محققین مدل‌سازی پاسخ گل‌دهی ۹ رقم کینوا به دما و فتوپریود را با رگرسیون خطی انجام دادند. ابتدا اثر دما و فتوپریود را جداگانه مورد بررسی قرار دادند و فتوپریود آستانه، فتوپریود بحرانی، دمای پایه و دمای بهینه گل‌دهی را شبیه‌سازی کردند و سپس از پارامترهای به‌دست آمده برای مدل‌سازی اثر متقابل دما و فتوپریود استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند بدون اثر متقابل دما و فتوپریود زمانی که دما بالاتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود مدل نمی‌توانست زمان گل‌دهی را خوب پیش‌بینی نماید. همچنین بدون اثر متقابل، در دوره رویشی ارقام کینوا، فتوپریود با عرض جغرافیایی منشا رقم رابطه منفی و با مدت زمان رشد رویشی رقم رابطه مثبت داشت. در بررسی اثر متقابل، پارامترهای پاسخ دما و فتوپریود با عرض جغرافیایی منشا رقم اثر معنی‌دار نداشت (Bertero, 1999b).

نتایج آزمایشی در کرج نشان داد که کلیه ژنوتیپ‌های کینوا مورد ارزیابی برای کشت بهاره در این منطقه سازگاری داشتند. کشت در نیمه دوم اردیبهشت سال ۱۳۹۷ باعث مصادف شدن مرحله گرده‌افشانی و پرشدن دانه با دمای بالای هوا در تیرماه و مردادماه شده و باعث کاهش عملکرد دانه و اجزای عملکرد شد. رسیدگی‌دانه‌های کینوا در ماه‌های مرداد و شهریور، به دلیل کمبود غذای کافی برای پرندگان در این مقطع زمانی، خسارت هجوم پرندگان را در پی داشت (Abasi *et al.*, 2018).

مدل فنولوژی، زمان وقوع یک فرآیند خاص در طی نمو پیش‌بینی می‌کند. به منظور مدیریت آفات، تنظیم برنامه آبیاری و برخی دیگر از مسائل دوران کاشت گیاه لازم است سرعت رشد و نمو گیاه تعیین شود. سرعت نمو گیاهان زراعی از زمان کاشت تا زمان رسیدگی، شدیداً وابسته به دمای محیطی است که این گیاهان با آن مواجه می‌شوند. ازآنجا که شرایط آب و هوایی در طول سال‌های مختلف بسیار متنوع است، بنابراین تاریخ‌های تقویمی نمی‌توانند مبنای خوبی جهت تصمیم گیری‌های مدیریتی در رابطه با موجودات و مراحل رشد و نمو آن‌ها باشند. بدین ترتیب با اندازه‌گیری مقدار گرمای تجمع‌یافته در طی زمان، یک قیاس زمانی فیزیولوژیک به‌دست می‌آید که ازنظر معیارهای زیست‌شناختی از دقت بیشتری نسبت به تاریخ تقویمی برخوردار است و این معیار در گیاهان مختلف به نوع گیاه بستگی داشته و در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت است. برای محاسبه واحدهای گرمایی از روش درجه–روز–رشد یا GDD استفاده می‌شود. درجه–روز–رشد مجموع میانگین درجه حرارت بالاتر

از دمای پایه است.

زمان حرارتی مورد نیاز برای تکمیل نمو کینوا در تاریخ‌های کاشت مختلف بین ۲۶۶۳ تا ۱۸۹۳ درجه روز گزارش کردند. دامنه تغییرات این زمان برای دوره سبز شدن بین ۸۳ تا ۱۵۰، مرحله غنچه‌دهی بین ۴۷۷ تا ۶۵۶، مرحله گرده‌افشانی ۳۴۸ تا ۸۹۰ و مرحله رسیدگی فیزیولوژیک ۱۴۳ تا ۱۱۲۱ درجه روز برآورد شد (Salehi *et al.*, 2019).

مدل‌های شبیه‌سازی نمو در دو گروه هستند، برخی مراحل نمو را بر اساس سرعت نمو که خود تابع دمای روزانه است شبیه‌سازی می‌کنند و گروه دیگر پیشرفت نمو را بر اساس درجه روزهای تجمعی پیش‌بینی می‌کنند (Nassiri *et al.*, 2000)؛ که مدل تهیه شده در این تحقیق از نوع دوم است. شبیه‌سازی نمو بخش مهمی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان از جمله کینوا است و تهیه، واسنجی و اعتبارسنجی چنین زیر مدل‌هایی برای ساخت مدل کامل شبیه‌سازی رشد کینوا ضروری می‌باشد. هدف از این تحقیق تهیه زیرمدلی کاربردی برای تعیین بهترین تاریخ کاشت گیاه کینوا بسته به نوع اقلیم و رقم مورد استفاده به لحاظ طول دوره رسیدگی (زودرس، متوسطرس و دیررس) می‌باشد.

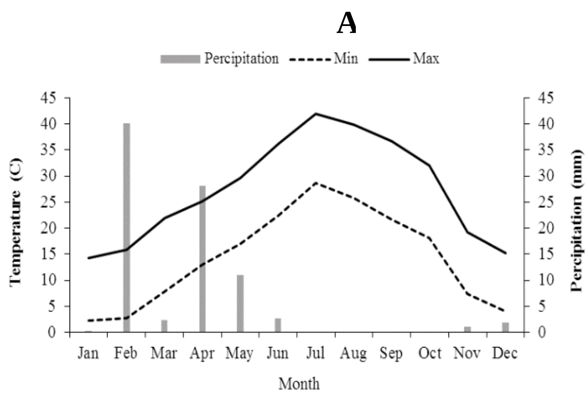
مواد و روش‌ها

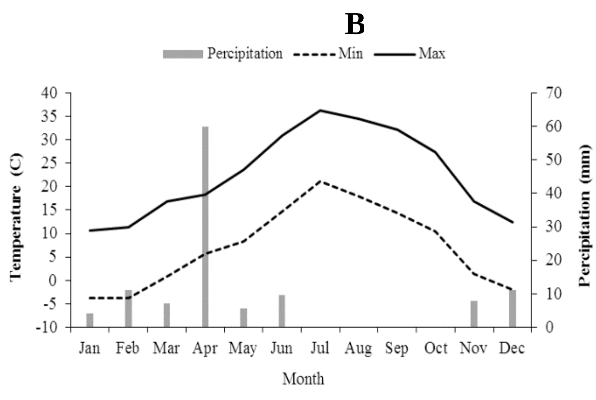
این آزمایش در دو منطقه از استان یزد (شهر یزد به‌عنوان منطقه ۱ و روستای ارنان به‌عنوان منطقه ۲) با ارتفاع متفاوت (اختلاف ارتفاع از سطح دریا ۸۰۰ متر) طبق زمان‌بندی جدول ۱ اجرا شد. آزمایش اول در مزرعه شخصی کشاورزی در شهر یزد با طول و عرض جغرافیایی ′۳۱°۵۵ و ′۵۴°۲۱ و ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا در سال زراعی ۹۹– ۱۳۹۸ اجرا شد و آزمایش دوم در مزرعه شخصی کشاورزی در روستای ارنان‌یزد با طول و عرض جغرافیایی ′۳۱°۱۷ و ′۵۴°۱۴ و ارتفاع ۲۰۰۰ متر از سطح دریا در همان سال زراعی اجرا شد. نکته قابل توجه در تفاوت اقلیم دو منطقه یعنی اختلاف حداقل دماهای این دو ناحیه بین ۸ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد و اختلاف حداکثر دماهای آن‌ها بین ۵ تا ۷ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱).

جدول ۱- تاریخ‌های کاشت در دو محل آزمایش

Table 1- Planting dates of the test sites

Resources	March فروردین	April اردیبهشت	May خرداد	June تیر	July مرداد	August اول شهریور	September نیمه شهریور	September مهر	January بهمن	February اسفند
Yazd date of planting تاریخ کاشت منطقه یزد	29	29	28	28	26	23	6	20	29	29
Ernan date of planting تاریخ کاشت منطقه ارنان	30	5 may	29	30	24	19	12	–	–	28





شکل ۱- خلاصه آمار هواشناسی شهر یزد (A) و روستای ارنان (B) در زمان آزمایش

Figure 1- Summary of meteorological statistics of Yazd city (A) and Arnan village (B) at the time of the experiment

تاریخ کاشت‌های این تحقیق در ۱۰ آزمایش جداگانه برای هر دو منطقه و در قالب آزمایش طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل‌های آزمایشی شامل ۵ لاین امید بخش اصلاح‌شده در مرکز تحقیقات شوری یزد به‌همراه رقم تی‌تی‌کاکا بود. لاین‌ها

شامل چهار لاین متوسطرس که در این آزمایش با شماره‌های ۱(NSRCQE)، ۲(NSRCQC)، ۳(NSRCQD) و ۶(NSRCQA)، یک لاین دیررس که با شماره ۴ (NSRCQB) و رقم زودرس تی‌تی‌کاکا که با شماره ۵ مشخص شده بود. ۳ ماه آبان، آذر و دی در یزد و ۴ماه آبان، آذر، دی و بهمن در روستای ارنان به‌دلیل سرمای زیاد، تاریخ کاشتی انجام نشد. از آن‌جایی که تاریخ کاشت اصلی گیاه کینوا در منطقه یزد، شهریور است (Salehi *et al.*, 2019)، بنابراین دو تاریخ کاشت در شهریور (نیمه اول و نیمه دوم شهریور) اجرا شد. کاشت، به روش خشکه‌کاری در کرت‌هایی به ابعاد ۳*۳متر، با دست، به روش خطی و در عمق یک تا دو سانتی‌متری انجام شد و بلافاصله بعد از کاشت به‌صورت غرقابی آبیاری شد. بعد از سبزشدن، تراکم بوته به ۶۴ بوته در مترمربع رسید.

داده‌های هواشناسی از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل کشت تهیه شد. ایستگاه هواشناسی یزد واقع در فرودگاه شهر یزد با طول و عرض جغرافیایی ۳۱°۵۴′ و ۵۴°۱۶′ است و روستای ارنان به‌دلیل نداشتن ایستگاه هواشناسی از داده‌های ایستگاه هواشناسی روستای گاریز واقع در ۸ کیلومتری این روستا با طول و عرض جغرافیایی ۳۱°۱۸′ و ۵۴°۰۶′ استفاده شد.

نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد (Salehi *et al.*, 2019). یادداشت‌برداری مراحل فنولوژیک، مشاهده بوته‌های دو ردیف از وسط هر کرت در طول دو متر بود. ملاک عمل یادداشت‌برداری هر مرحله از نمو (سبزشدن، گل‌دهی و تغییر رنگ بوته‌ها)، ۵۰ درصد بوته‌های مورد بررسی بود.

محاسبات آماری با کمک نرم‌افزار EXCEL 2010 انجام شد و تمامی نمودارها نیز در محیط EXCEL 2010 ترسیم شدند.

برای محاسبه درجه-روز-رشد از روابط (۱)، (۲) و (۳) استفاده شد.

TMP=(Tmax+Tmin)/ (۱)

DTTi=TMPi-Tb (۲)

TTi=TTi-1+DTTi (۳)

که در این معادلات TMP میانگین دمای روزانه، T_{max} حداکثر دمای روزانه، T_{min} حداقل دمای روزانه، T_b دمای پایه، DTT درجه روز رشد روزانه، TT درجه روز رشد تجمعی، i روز مورد نظر برای محاسبه روز i ام و i-1 روز قبل از آن هستند (Soltani *et al.*, 2006).

برای به‌دست آوردن پایه اطلاعات درجه-روز-رشد ابتدا درجه-روز-رشد محاسبه شده برای لاین‌های کینوا به سه گروه زودرس، متوسطرس و دیررس دسته‌بندی شد و میانه داده‌های درجه-روز-رشد هر گروه در جدول قرار داده شد (جدول ۲). پس از محاسبه طول‌روزهای ویژه لاین‌های کینوا اقدام به تهیه زیرمدل با زبان برنامه‌نویسی FST شد. در تهیه جدول طول‌روز با توجه به روزکوتاه بودن کینوا، برای تمام لاین‌ها در مدل تا ۱۲/۵ ساعت سرعت نمو یک و بعد از ۱۳/۸ ساعت سرعت نمو صفر در نظر گرفته شد. دمای پایه در مدل دو درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد (Eghbali *et al.*, 2021).

جدول۲- میانه درجه-روز-رشد لاین‌های کینوا برای نمو کینوا

Table 2- Mean degree-day-growth of quinoa lines

مراحل نمو Developmental stages	پارامتر درجه-روز-رشد لاین‌های کینوا Growthing degree day of quinoa lines					
	زودرس Early maturity		متوسطرس Medium maturity		دیررس Late maturity	
	٦ماهه نخست The first 6 months	٦ماهه دوم The second 6 months	٦ماهه نخست The first 6 months	٦ماهه دوم The second 6 months	٦ماهه نخست The first 6 months	٦ماهه دوم The second 6 months
سبزشدن Emergence day	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5
گل‌دهی Anthesis day	1072.7	1072.7	1155.5	1155.5	1333.8	1333.8
رسیدگی فیزیولوژیک Physiological Maturity	1577.3	1577.3	17675.5	1767.5	2357	2357

با توجه به تفاوت زیاد داده‌های درجه-روز-رشد ۶ ماهه اول سال میلادی با شش ماهه دوم، برای هر گروه از لاین‌های کینوا ۲ جدول درجه-روز-رشد ۶ ماهه اول (از دی تا خرداد) و ۶ ماهه دوم (از تیر تا آذر) تشکیل گردید (Eghbali *et al.*, 2021). بعد از تهیه زیرمدل نمو اقدام به واسنجی یا کالیبراسیون آن شد. برای کالیبراسیون، زیرمدل تهیه شده بارها و در هر بار شش دفعه اجرا شد (سه گروه زودرس،

متوسطرس و دیررس و برای هر گروه دو دفعه شش ماهه اول و شش ماهه دوم سال) و خروجی آن با اندازه‌گیری‌های شهر یزد مقایسه شد. در صورت لزوم تغییراتی در داده‌های جدول درجه-روز-رشد مدل داده شد و دوباره مدل اجرا گردید تا بهترین خروجی و نزدیک‌ترین داده به مقدار اندازه‌گیری به‌دست آمد که به‌عنوان برآورد نهایی پارامتر جدول انتخاب شد. در این مطالعه تمامی دستورات زیرمدل به زبان FST تبدیل شد (شکل ۲).

در نهایت ارزیابی زیرمدل با داده‌های روستای ارنان و بر اساس پارامترهای برآورد شده در واسنجی انجام شد.

برای واسنجی و ارزیابی کارایی زیرمدل از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، آزمون خط ۱:۱ روز تا سبزشدن، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک استفاده شد.

RMSE جهت مقایسه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده استفاده شده است که هرچه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده آن است که شبیه‌سازی بهتر انجام شده است. چنانچه مقدار nRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف ارزیابی خواهد شد (Nassiri *et al.*, 2019). هرچه مقدار d به‌دست آمده توسط مدل به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است میزان پیش‌بینی صفت را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده شده انجام دهد (Willmott, 1982). بهترین حالت MB، صفر است و هرچه از صفر کمتر باشد یعنی مدل کمتر از واقعیت و هرچه از صفر بزرگ‌تر باشد یعنی مدل بیشتر از واقعیت تخمین می‌زند. شاخص کارایی مدل ME، بین صفر و یک خوب است و بهترین حالت عدد یک است و بدترین حالت، زمانی که منفی باشد.

```
TITLE DEVELOPMENT WITH TEMPERATURE SUM
INITIAL
INCON ZERO= 0.
INCON ITSUM = 0.
CONSTANT PI = 3.1416
PARAM LATD = 35.
RAD = PI/180.
SINLAT = SIN (RAD*LATD)
COSLAT = COS (RAD*LATD)
SINDCM = SIN (RAD*23.45)
TRANSLATION_GENERAL DRIVER = 'EUDRIV'
*TIMER STTIME = 220., FINTIM = 1000., DELT = 1., PRDEL = 5.
TIMER STTIME = 263., FINTIM = 365., DELT = 1., PRDEL = 1.
PARAM TB = 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1072.75, 1., 1770.0, 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1155.55, 1., 2324.5, 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1333.85, 1., 2546.0, 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 872.75, 1., 1317.7, 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1055.55, 1., 1790.5, 2.
FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1246.00, 1., 1860.0, 2.
FUNCTION PF2TB  = 0., 1., 12.5, 1., 13.8, 0., 16.5, 0.
FINISH STAGE>2.
*PRINT TSUM, STAGE, DAYL, PF
PRINT TMMX, TMMN, DAYL, TA, TSUM, STAGE, PF
WEATHER WTRDIR='C:\WEATHER\';CNTR='NL';ISTN=1;IYEAR=2008

DYNAMIC
DATE = AMOD (TIME, 365.)
TA = 0.5 * (TMMX+TMMN)
TSUM = INTGRL (ITSUM, RTSUM)
RTSUM = MAX(0., TA-TB)
STAGE = AFGEN (STAGET, TSUM)
PF = INSW(DAYL-13.8, AFGEN(PF2TB, DAYL), 0.)

*CALCULATION OF DAY LENGTH

SINDEC = -SINDCM*COS(2.*PI*(TIME+10.)/365.)
COSDEC = SQRT(1.-SINDEC*SINDEC)
A = SINLAT*SINDEC
B = COSLAT*COSDEC
DAYL = 12.*(1.+(2./PI)*ASIN(A/B))
END
```

شکل ۲- دستورات زیرمدل نمو کینوا به زبان برنامه‌نویسی FST بر اساس درجه-روز-رشد

Figure 2- Quinoa development model commands in FST language based on Growing Degree Day (GDD)

ضرایب رگرسیون ساده خطی (a و b) بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی، ضرایب a و b به‌ترتیب نشان‌دهنده مقدار انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات و مقدار شیب خط رگرسیون از خط ۱:۱ می‌باشند. اگر نقاط پیش‌بینی شده روی خط ۱:۱ قرار گیرند، نشان‌دهنده ایده‌آل بودن مدل است. خط ۱:۱ دارای عرض از مبدأ صفر (a=0) و شیب ۴۵ درجه (b=1) است (Nassiri *et al.*, 2019).

نتایج و بحث

زیرمدل تهیه شده به زبان FST برای پیش‌بینی سه مرحله اصلی نمو لاین‌های کینوا (سبزشدن، گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیک) در سه گروه زودرس، متوسط‌رس و دیررس آماده شد. ابتدا پارامترهای زیرمدل با استفاده از میانه داده‌های درجه-روز-رشد واقعی مراحل فنولوژیک به‌دست آمده در آزمایش‌های مزرعه‌ای شهر یزد استخراج شدند (جدول ۲)، سپس عمل واسنجی یعنی تنظیم پارامترهای جدول درجه-روز-رشد زیرمدل در محدوده معقول آن‌ها انجام شد به طوری‌که نتایج شبیه‌سازی شده، قابل مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده باشد. در نهایت داده‌های جدول ۲ به شرح جدول ۳ تغییر یافت به‌نحوی‌که پیش‌بینی مراحل اصلی نمو با حداقل مقدار شاخص‌های سنجش آماری صورت گیرد.

جدول ۳- مقادیر درجه-روز-رشد لاین‌های کینوا بعد از واسنجی زیرمدل نمو کینوا

Table 3- Growing Degree Day (GDD) values of quinoa lines after calibration of quinoa model

مراحل نمو Developmental stages	پارامتر درجه-روز-رشد لاین‌های کینوا Growthing degree day of quinoa lines					
	زودرس Early maturity		متوسطرس Medium maturity		دیررس Late maturity	
	۶ماهه نخست The first 6 months	۶ماهه دوم The second 6 months	۶ماهه نخست The first 6 months	۶ماهه دوم The second 6 months	۶ماهه نخست The first 6 months	۶ماهه دوم The second 6 months
سبزشدن Emergence day	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5
گل‌دهی Anthesis day	1072.7	872.7	1155.5	1055.5	1333.8	1246
رسیدگی فیزیولوژیک Physiological Maturity	1770	1317.7	2324.5	1790.5	2546	1860

نتایج اجرای زیرمدل تهیه شده به زبان FST و مقدار شاخص‌های آماری برای تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی در شکل ۳ ارائه شده است. برای تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی بر اساس این نتایج، مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه ۵/۵ تا ۶/۵ روز، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV) در دامنه ۹/۵ تا ۱۳/۵ درصد، شاخص توافق ویلموت (d) در دامنه ۰/۸ تا ۰/۹، کارایی مدل (ME) در دامنه ۰/۴۳ تا ۰/۷۶، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه ۰/۰۹ تا ۰/۱۳ و ضریب تبیین (R^2) در دامنه ۰/۸۳ تا ۰/۹۳ قرار گرفت. بنابراین مرحله گل‌دهی بسیار خوب تخمین زده شده است. نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۳).

در بررسی تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی، بزرگ‌ترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین‌های دیررس (R^2=۰/۹۳) و کوچک‌ترین ضریب تبیین در رقم زودرس (R^2=۰/۸۶) به‌دست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مراحل نموی دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در رقم زودرس ۸۶ درصد و در لاین‌های دیررس ۹۳ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی‌شده تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی، بوسیله تغییرات در مقادیر مشاهده‌شده تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی کینوا قابل توضیح است (شکل ۳).

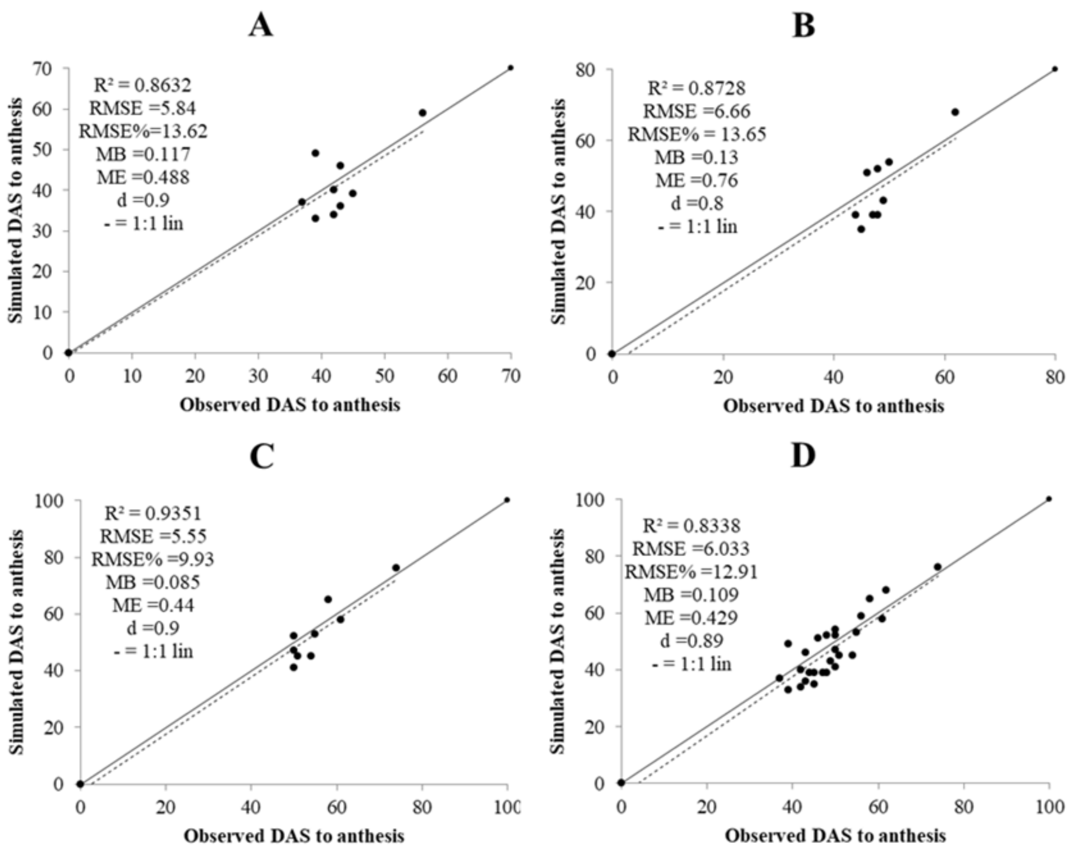
بر اساس شاخص میانگین انحراف از مدل (MB)، تطابق داده‌های شبیه‌سازی‌شده روز تا گل‌دهی با مقادیر مشاهده‌شده در لاین دیررس کینوا بهتر از سایر لاین‌ها اجرا شد (شکل ۳).

در بررسی شاخص کارایی مدل (ME)، در تمامی موارد مثبت شد بنابراین مدل در شبیه‌سازی روز تا گل‌دهی قابل‌قبول است. بهترین حالت شاخص کارایی مدل (ME=۰/۷۶) در لاین‌های متوسط‌رس محاسبه شد زیرا در این شاخص هرچه عدد به یک نزدیک‌تر باشد خطای شبیه‌سازی، کمتر است (شکل ۳).

بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت (d=۰/۹) در رقم زودرس تی‌تی‌کاکا و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت (d=۰/۸) در

لاین‌های متوسطرس محاسبه شد که نشان از شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا گل‌دهی، در تمامی لاین‌های کینوا است (شکل ۳).

نتایج واسنجی تعداد روز تا گل‌دهی با مدل‌های تجربی، در دما و طول‌روزهای متفاوت برای کینوا نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۷/۲ تا ۷/۸ روز و ضریب تبیین (R^2) ۰/۷۹ تا ۰/۸۵ به‌دست آمد. در بررسی شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (Bertero *et al.*, 1999a). در تحقیقی دیگر نتایج واسنجی تعداد روز تا گل‌دهی، توسط پراگر و همکاران با مدل CSM-CROPGRO برای دو رقم جسی و زنو کینوا در آلمان نشان دادند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۳/۱ روز و شاخص توافق ویلموت (d) ۰/۹۸ برای هر دو رقم به‌دست آوردند که به نتایج این تحقیق نزدیک است (Prager *et al.*, 2019).



شکل ۳- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده روز تا گل‌دهی منطقه یزد در رقم زودرس (A)، لاین‌های متوسطرس (B)، لاین دیررس (C) و لاین‌های کینوا (D) به همراه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، خط 1:1 (صاف) و خط رگرسیون (بریده)

Figure 3- Observed and simulated values of days to flowering of Yazd region in early cultivar (A), medium maturity lines (B), late maturity line (C) and quinoa lines (D) with root mean square error (RMSE), coefficient of variation NRMSE (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), mean model deviation (MB), coefficient of determination (R^2), line 1: 1 (smooth) and regression line (cut)

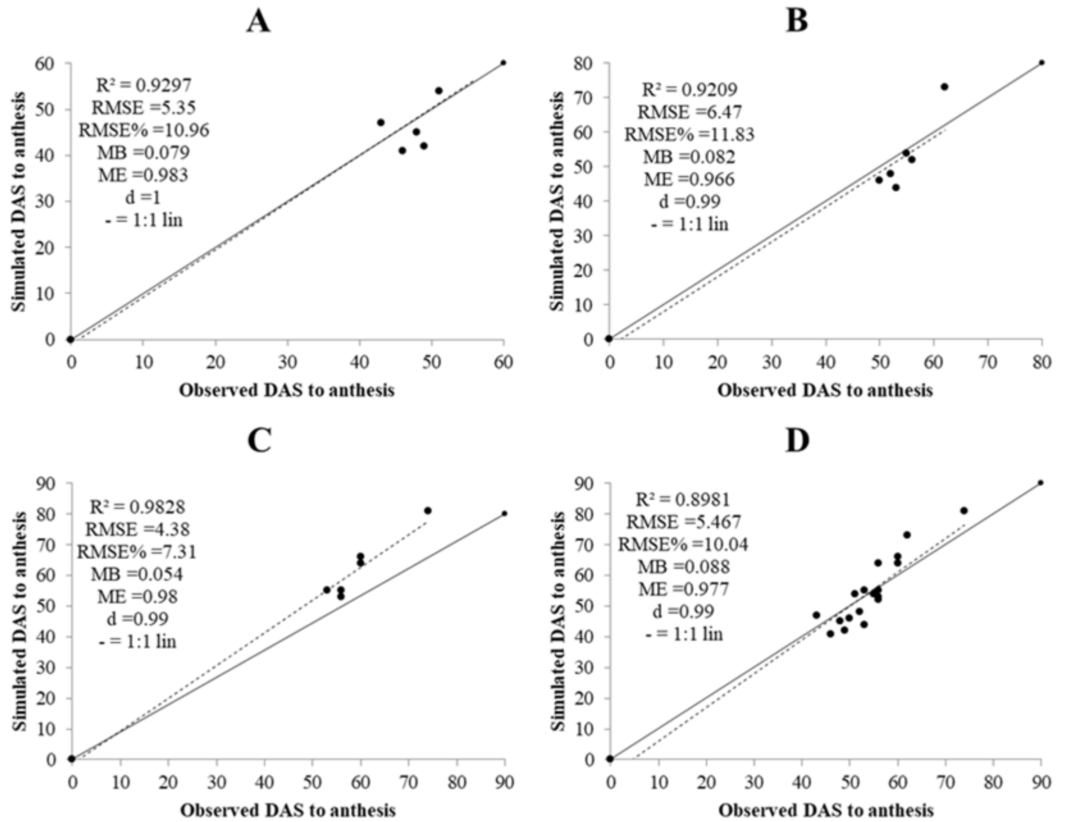
به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی زیرمدل تهیه شده، داده‌های روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت.

ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV) بین ۷ تا ۱۲ درصد، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۴/۴ تا ۶/۴ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین ۰/۹۹ تا ۱، کارایی مدل (ME) بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۸، میانگین انحراف از مدل (MB) بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۸ و ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب

روز تا گل‌دهی کینوا با زیرمدل نوشته شده به زبان FST داشت و مقادیر روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (شکل ۴).

مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده با خط ۱:۱ در مورد روز تا گل‌دهی کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت؛ بنابراین زیرمدل واسنجی‌شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا گل‌دهی کینوا برخوردار بود.

نتایج ارزیابی تعداد روز تا گل‌دهی با مدل‌های تجربی در دما و طول‌روزهای متفاوت برای کینوا نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۴/۵ تا ۴/۹ روز و ضریب تبیین (R^2) ۰/۸۵ تا ۰/۸۷ به‌دست آمد. در بررسی شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (Bertero *et al*., 1999a). محققین دیگر نتایج ارزیابی تعداد روز تا گل‌دهی با مدل CSM-CROPGRO برای دو رقم جسی و زنو کینوا در آلمان نشان دادند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱/۵ روز و شاخص توافق ویلموت (d) ۰/۹۹۷ برای هر دو رقم به‌دست آوردند که به نتایج این تحقیق نزدیک است (Prager *et al*., 2019).



شکل ٤- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده روز تا گل‌دهی منطقه ارنان در رقم زودرس (A)، لاین‌های متوسطرس (B)، لاین دیررس (C) و لاین‌های کینوا (D) به همراه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، خط ۱:۱ (صاف) و خط رگرسیون (بریده)

Figure 4- Observed and simulated values of days to flowering of Arnan region in early cultivar (A), medium maturity lines (B), late maturity line (C) and quinoa lines (D) with root mean square error (RMSE), coefficient of variation NRMSE (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), mean model deviation (MB), coefficient of determination (R^2), line 1: 1 (smooth) and regression line (cut)

مقایسه نتایج زیرمدل با داده‌های اندازه‌گیری شده و مقدار شاخص‌های آماری برای تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در شکل ۵ ارائه شده است. برای تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک بر اساس این نتایج مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه ۱۰/۶ تا ۱۰/۹ روز، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV) در دامنه ۱۰/۵ تا ۱۴ درصد، شاخص توافق ویلموت (d) در دامنه ۰/۶۶ تا ۰/۶۸، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه ۰/۰۹ تا ۰/۱۱و ضریب تبیین (R^2) در دامنه ۰/۸۸ تا ۰/۹۱ قرار گرفت؛ بنابراین مرحله رسیدگی فیزیولوژیک بسیار خوب تخمین زده شده است. نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که

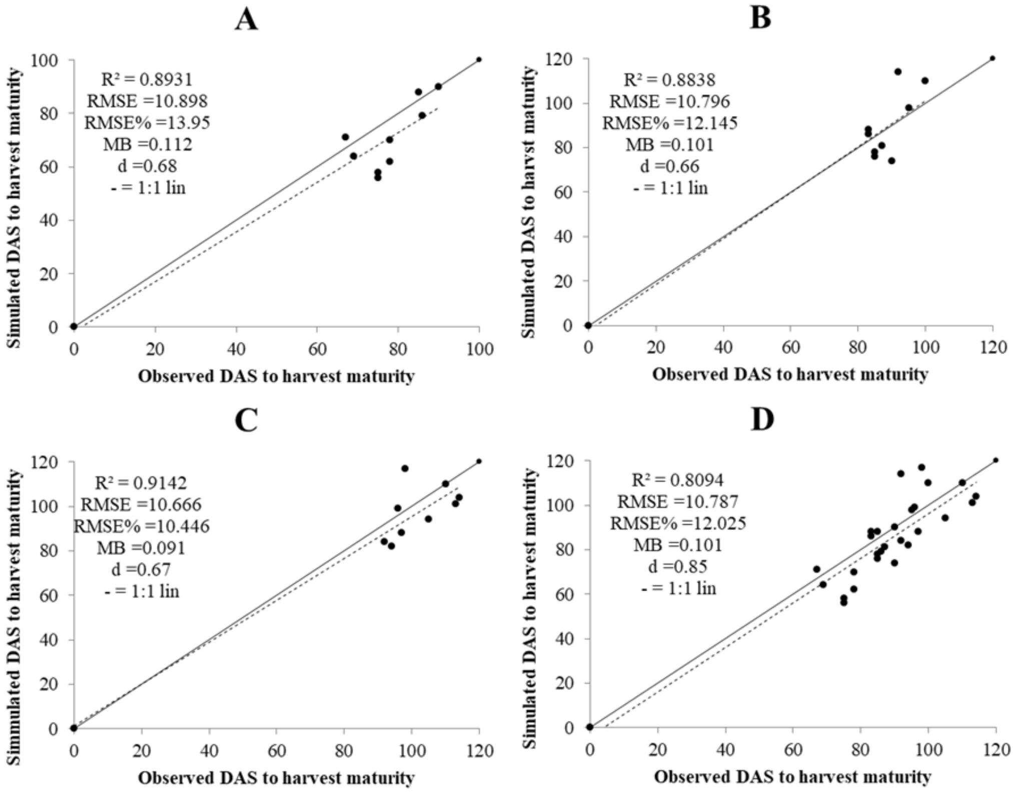
شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۵).

در بررسی تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، بزرگ‌ترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین‌های دیررس (R^2=۰/۹۱) و کوچک‌ترین ضریب تبیین در لاین‌های متوسطرس (R^2=۰/۸۸) به‌دست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مراحل نموی دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در لاین‌های متوسطرس ۸۸ درصد و در لاین‌های دیررس ۹۱ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی شده تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، به‌وسیله تغییرات در مقادیر مشاهده‌شده تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا قابل توضیح است (شکل ۵).

بر اساس شاخص میانگین انحراف از مدل (MB) تطابق داده‌های شبیه‌سازی‌شده روز تا رسیدگی فیزیولوژیک با مقادیر مشاهده شده در لاین دیررس کینوا بهتر از سایر لاین‌ها اجرا شد (شکل ۵).

بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت (d=۰/۶۸) در رقم زودرس تی‌تی‌کاکا و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت (d=۰/۶۶) در لاین‌های متوسطرس محاسبه شد که نشان از شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در تمامی لاین‌های کینوا است (شکل ۵).

نتایج واسنجی تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک پراگر و همکاران با مدل CSM-CROPGRO برای دو رقم جسی و زنو کینوا در آلمان نشان دادند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۷ روز و شاخص توافق ویلموت (d) ۰/۸۹۵ برای هر دو رقم به‌دست آوردند که به نتایج این تحقیق نزدیک است. پیش‌بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نموی گیاهان اهمیت زیادی دارد چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حدود زیادی تحت تاثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می باشد. به همین ترتیب، ممکن است پیش بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرآیندها به پیش‌بینی نمو فنولوژیک وابسته باشند (Soltani *et al.*, 2006).



شکل ۵- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده روز تا رسیدگی فیزیولوژیک منطقه یزد در رقم زودرس (A)، لاین‌های متوسطرس (B)، لاین دیررس (C) و لاین‌های کینوا (D) به همراه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، خط ۱:۱ (صاف) و خط رگرسیون (بریده)

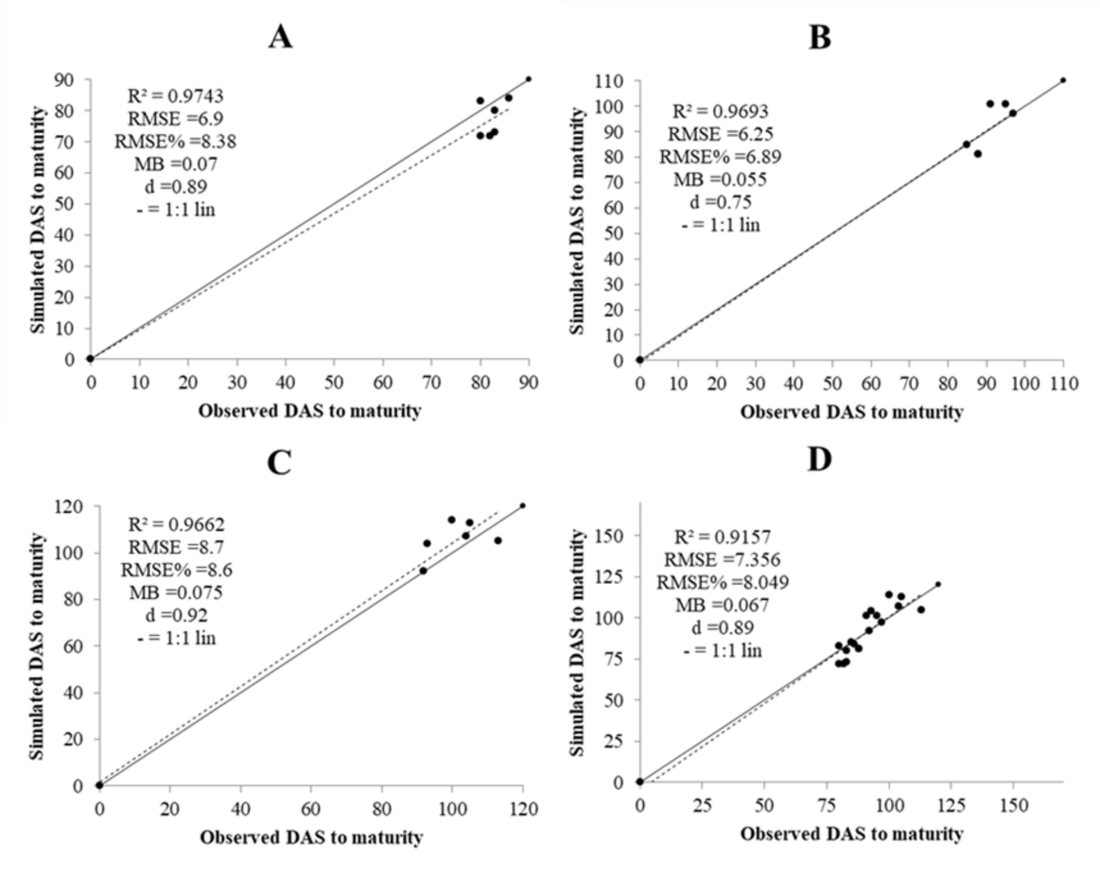
Figure 5- Observed and simulated values of days to physiological maturity of Yazd region in early cultivar (A), medium maturity lines (B), late maturity line (C) and quinoa lines (D) with root mean square error (RMSE), coefficient of variation nRMSE (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), mean model deviation (MB), coefficient of determination (R^2), line 1:1 (smooth) and regression line (cut)

به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی زیرمدل تهیه شده، داده‌های روز تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌شده آن‌ها در آزمایش میدانی منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت.

ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV) بین ۶/۸ تا ۸/۶ درصد، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۶/۲ تا ۸/۷ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۲، میانگین انحراف از مدل (MB) بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۸ و ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب روز تا رسیدگی فیزیولوژیک با زیرمدل نوشته‌شده به زبان FST داشت و مقادیر روز تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (شکل ۶).

مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده با خط ۱:۱ در مورد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت؛ بنابراین زیرمدل واسنجی‌شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا برخوردار بود.

نتایج ارزیابی تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک سایر محققین با مدل CSM-CROPGRO برای دو رقم جسی و زنو کینوا در آلمان نشان دادند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۷ روز و شاخص توافق ویلموت (d) ۰/۸۹۵ برای هر دو رقم به‌دست آوردند که به نتایج این تحقیق نزدیک است (Prager *et al.*, 2019).



شکل ۶- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده روزها تا رسیدگی فیزیولوژیک منطقه ارنان در رقم زودرس (A)، لاین‌های متوسط‌رس (B)، لاین دیررس (C) و لاین‌های کینوا (D) به همراه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، خط ۱:۱ (صاف) و خط رگرسیون (بریده)

Figure 6- Observed and simulated values of days until physiological maturity of Arnan region in early cultivar (A), medium middle lines (B), late line (C) and quinoa lines (D) with root mean square error (RMSE), coefficient of variation nRMSE (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), mean model deviation (MB), coefficient of determination (R^2), line 1: 1 (smooth) and regression line (cut)

از آن‌جایی که درجه-روز-رشد، پارامتر متداول و کاربردی در پیش‌بینی مراحل مختلف فنولوژی گیاهان است (Nassiri, 2000) به کمک آن می‌توان تاریخ کاشت مناسب را مشخص نمود و در ساخت مدل‌های مکانستیکی ساده قابل استفاده است. در آزمون‌های انجام شده توسط محققین مشخص شد که قدرت مدل‌های ساده بیشتر از مدل‌های پیچیده است (Rahban *et al.*, 2021). مدل‌های مکانستیکی ساده علاوه بر این‌که محدودیت مدل‌های تجربی به لحاظ کاربرد در اقلیم‌های مختلف نداشته و به هزینه‌های زیاد برای تعیین پارامترهای مناطق جدید هم نیاز ندارند. در ضمن تهیه، واسنجی و اعتبارسنجی زیر مدل مکانیستیکی نمو کینوا کمکی در جهت ساخت مدل کامل شبیه‌سازی رشد کینوا در آینده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که مدل نمو تهیه شده برای کینوا بر حسب درجه-روز-رشد به خوبی مراحل نمو (سبز شدن، گل‌دهی و رسیدگی) انواع این گیاه به لحاظ رسیدگی (زودرس، متوسط‌رس و دیررس) پیش‌بینی می‌کند و می‌توان به کمک آن تاریخ مناسب کاشت در مناطق مختلف تعیین کرد. این زیرمدل کالیبره شده هم‌اکنون می‌تواند برای ارزیابی تاثیرات مختلف دمایی و فتوپریودی برای تصمیم‌گیری در طیف وسیعی از محیط‌های رشد در نظام‌های کشت کینوا در شرایط اقلیمی جاری و آینده مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین از این زیرمدل در کارهای آموزشی- تحقیقاتی و کاربردی در مزرعه می‌توان استفاده کرد.

References

1. Abasi, S., Cordnaeich A., & Bagheri, M. (2018). *Evaluation of genetic diversity of new chenopodium quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) cultivars based on agromorphological traits*. 15th National Iranian Congress Science Congress, 2-5 Sep. 2019. Karaj, Iran. (in Persian with English abstract).
2. Bertero, H. D., King, R. W., & Hall, A. J. (1999a). Modelling photoperiod and temperature responses of flowering in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crop Reserch*, *63*, 19-34.
3. Bertero, H. D., King, R. W., & Hall, A. J. (1999b). Photoperiod-sensitive evelopment phases in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research 60*, 231-243.
4. Eghbali, Sh., Jahan, M., Nassiri, M. M., & Salehi, M. (2021). The response of phenological stages of quinoa promising lines to temperature and photoperiod regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *19*, 261-274. https://doi.org/10.22067/jcesc.2021.69051.1032
5. FAO. (2014). *Food and nutrition in numbers. Food and Agriculture Organisation*, Rome, Accessed 27 March 2015.
6. Fischer, S., Wilckens, R., Jara, J., Aranda, M., Valdivia, W., Bustamante, L., Graf, F., & Obal. I. (2017). Protein and antioxidant composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) sprout from seeds submitted to water stress, salinity and light conditions. *Industrial Crops & Products 107*, 558-564. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.035
7. Hirich, A., Choukr-Allah, R., & Jacobsen, S. E. (2014). Quinoa in Morocco-Effect of sowing dates on development and yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *23*, 1-7. https://doi.org/10.1111/jac.12071
8. Matthews, R. B., Rivington, M., Muhammed, S., Newton, A. C., & Hallett, P. D. (2013). Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: the role of crop modelling. *Global Food Security*, *2*, 24-28. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.11.009
9. Nassiri, M. M. (2000). *Modelling Potential crop growth processes*. Jahad Daneshgahi Mashhad press.
10. Nassiri, M. M., Koocheki, A. R., Fallahpour, F., & Amiri, M. B. (2019). Optimization of Nitrogen Fertilizer and Irrigation in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivation by Central Composite Design. *Journal of Agroecology*, *11*, 515-530. https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.31912
11. Pourghasemian, N., Moradi, R., & Naghizadeh, M. (2018). Effect of Planting Time and Place on Quality of Some Brompt on Stock Varieties for Cultivation in Bardsir, Kerman. *Crops Improvement*, *20*, 679-692. https://doi.org/10.22059/jci.2018.246733.1879
12. Präger, A., Boote, K. J., Munz, S., & Hönninger, S. G. (2019). Simulating growth and development processes of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): adaptation and evaluation of the CSM-CROPGRO model. *Agronomy*, *9*, 832. https://doi.org/10.3390/agronomy9120832
13. Qulipor, A., Golkhodani, K., Latifi, N., & Moqadam, M. (2003). Comparison of growth and yield of rapeseed varieties in rain fed conditions. *Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources*, *3*(1), 111-121.
14. Rahban, S., Torabi, B., Soltani, S., & Zeinali, E. (2021). Using SSM-iCrop Model to Predict Phenology, Yield, and Water Productivity of Canola (*Brassica napus* L.) in Iran Condition. *Journal of Agroecology*, *13*, 157-177. https://doi.org/10.22067/jag.v13i2.84057
15. Salehi, M., & Dehghani, F. (2017). *Quinoa, suitable semi cereal for salt water resources*. Report of Minisrty of

Agricultural Jihad.

16. Salehi, M., Soltani, V., & Dehghany, F. (2019). The effect of planting date on phenological stages and yield of quinoa seeds in saline conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *12*, 923-932. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1514.1341
17. Soltani, A., Robertson, M. J., Mohammad-Nejad, Y., & Rahemi-Karizaki, A. (2006). Modeling chickpea growth and development: leaf production and senescence. *Field Crops Reserch 99*, 14-23. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.005
18. Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. *The Journal of Agricultural Science*, *90*, 2541-2547. https://doi.org/10.1002/jsfa.4158
19. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *63*, 1309-1313. https://www.jstor.org/stable/26222954
20. Yang, A., Akhtar, S. S., Amjad, M., Iqbal, S., & Jacobsen, S. E. (2016). Growth and Physiological Responses of Quinoa to Drought and Temperature Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *202*, 445-453. https://doi.org/10.1111/jac.12167